

# Verschleißprognose für Mix-Schild TVM in Lockergesteinen

## Wear prognosis for Mix-Shield TBMs in soils

Florian Köppl<sup>1</sup>, Kuroschi Thuro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dipl. Geol., F. Köppl, Herrenknecht AG, koeppl.florian@herrenknecht.de

<sup>2</sup> Prof. Dr. rer. nat., K. Thuro, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Technische Universität München, thuro@tum.de

### Zusammenfassung

Der Verschleiß der Abbauprozesse ist eine zentrale Herausforderung beim Vortrieb mit Mix-Schild TVM in Lockergesteinen, weil dieser die häufigste Ursache für Vortriebsunterbrechungen darstellt. Die Kosten für die Vortriebsunterbrechungen liegen häufig um ein vielfaches höher als die Kosten für die zu wechselnden Abbauprozesse, gleichzeitig existiert jedoch kein Modell das eine zuverlässige Prognose der Standzeit der Abbauprozesse und der für die Werkzeugwechsel notwendigen Vortriebsunterbrechungen erlaubt. Auf Basis einer Datenanalyse von 18 Vortrieben mit Mix-Schild TVM konnten alle maßgeblichen Einflussfaktoren auf die Standzeit der Abbauprozesse quantifiziert werden. Daraus kann auf Grundlage empirischer Korrelationen mit Parametern der Maschinenauslegung, der Steuerung des Abbauprozesses und geotechnischen Parametern ein Prognosemodell für die Standzeit der Abbauprozesse abgeleitet werden. Das Modell wird durch einen Algorithmus ergänzt, der eine Übersetzung der Standzeit in Intervalle für Vortriebsunterbrechungen und die notwendige Anzahl an Werkzeugwechseln erlaubt. Auf dieser Grundlage ist eine umfassende probabilistische Prognose der Verschleißkosten und eine Abschätzung der verbundenen Risiken möglich.

**Schlüsselworte:** Mix-Schild TVM, Abbauprozesse, Verschleißprognose, Lockergestein

### Abstract

The wear of the cutting tools is a major issue in Mix-Shield tunneling in soft ground, because it is the most common reason for intermittence of TBM advance. The costs for the TBM downtime commonly exceed the costs for the changed cutting tools. At the same time there are no models available, that allow for the reliable prognosis of cutting tool life and the corresponding intermittence of TBM advance and downtime for tool changes. Based on a detailed data analysis of 18 Mix-Shield TBM drives it was possible to identify and quantify all relevant influencing factors on cutting tool life. This leads to a prognosis model for cutting tool life based on empirical correlations with soil parameters and TBM design and advance parameters. For a realistic approach the model is completed by an engineering process to translate the cutter life into distances for intermittence of TBM advance and required amount of cutting tools to be changed. As a result the model and the engineering process enable a comprehensive probabilistic prognosis of the wear costs and related risks.

**Keywords:** Mix-Shield TBM, cutting tools, wear prognosis, soil, Soil Abrasivity Index (SAI)

## 1 Einleitung

Der Verschleiß der Abbauprozesse ist eine zentrale Herausforderung beim Vortrieb mit Mix-Schild TVM in Lockergesteinen, weil dieser die häufigste Ursache für Vortriebsunterbrechungen darstellt. Durch eine detaillierte Datenanalyse aus 10 Referenzprojekten konnte auf Basis empirischer Korrelationen mit Parametern der TVM Auslegung, der Steuerung des Abbauprozesses und geotechnischen Parametern ein Prognosemodell für die Standzeit der Abbauprozesse abgeleitet werden. Einen Algorithmus zur Übersetzung der Standzeit in Intervalle für Vortriebsunterbrechungen  $I$  und Anzahl der Werkzeugwechsel  $n_c$  ergänzt das Prognosemodell. Dabei werden die Umgebungsbedingungen für die Vortriebsunterbrechungen, sowie mögliche Abweichungen berücksichtigt, um eine umfassende probabilistische Prognose der Verschleißkosten zu erreichen.

## 2 Übersicht Datenanalyse

Die empirische Datenanalyse umfasst 10 Referenzprojekte mit 13 Mix-Schild TVM in 18 Vortrieben. Im entsprechenden Ausbruchvolumen von 5.314.000 m<sup>3</sup> wurden in Summe 1.630 Schälmesser und 2.600 Schneidrollen gewechselt.

Die Standzeit der Abbauprozesse wurde für die Analyse auf Basis des Spurradius der Werkzeuge  $r_{\text{Spur}}$  in mm und der Penetration  $p$  in mm/rev mit dem Laufweg  $s_c$  der Abbauprozesse in km zwischen der Einbaustationierung  $b_A$  und der Ausbaustationierung  $b_V$  in m beschrieben (1).

$$s_c = \frac{2\pi}{1000} \cdot r_{\text{Spur}} \cdot \frac{(b_V - b_A)}{p} \quad (1)$$



Zusätzlich wurden alle präventiven Werkzeugwechsel und Wechsel auf Grund von Schäden aus den Basisdaten eliminiert. Anschließend wurde der Einfluss verschiedener Parameter auf den Laufweg  $s_c$  untersucht, dazu wurden folgende Einflussbereiche (THURO 2002) berücksichtigt:

- Auslegung der TVM
- Steuerung des Abbauprozesses
- Geotechnische Parameter

Für die weitere Datenanalyse wurden geotechnische Homogenbereiche nach folgenden Kriterien gebildet:

- Gleichbleibender Anteil verschiedener Bodenarten in der Ortsbrust in % (+/-10%)
- Gleichbleibende Überlagerung über der Tunnelachse  $H_{TA}$  in m (+/-10 m)
- Gleichbleibender Wasserspiegel über der Tunnelachse  $W_{TA}$  in m (+/- 5 m)

Die Datenanalyse erlaubt die Identifikation und Qualifizierung der in Tab. 1 zusammengefassten Haupteinflussfaktoren auf den Laufweg  $s_c$ .

Tab. 1: Haupteinflussfaktoren auf den Laufweg  $s_c$ .

Tab. 1: Main influencing factors on the cutting distance  $s_c$ .

TVM Auslegung:	
Schneiradöffnungsverhältnis $OR_{TVM}$ [%]	28,4 – 31,0
Schneidrollen:	
Durchmesser [inch] / [mm]	17" / 432
Härte der Schneidringe [HRC]	57 +/-1
Schneidringbreite $b_{SR}$ [mm]	16 – 24
Höhe ü. Schneiradstahlstruktur $h_{SR}$ [mm]	175
Schälmesser:	
Breite $b_{SM}$ [mm]:	100
Verschleißschutz Schneide:	Hartmetall
Anteil Hartmetall in der Rückenfläche [%]:	30 – 85
Höhe ü. Schneiradstahlstruktur $h_{SM}$ [mm]	140
Spurbesatz $k$ [-]	1 – 6
Steuerung Abbauprozess:	
Schneiraddrehzahl $rpm$ [1/min]	0,9 – 2,2
Penetration $p$ [mm/rev]	4,7 – 43,9
Dichte d. Stützflüssigkeit $\rho_{SF}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1,15 – 1,37
Geotechnische Parameter:	
Korngröße $D_{60}$ [mm]	0,01 – 15,14
Wichte $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	17,0 – 21,0
Kohäsion $c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]	0,0 – 25,0
Reibungswinkel $\phi'$ [°]	15,0 – 43,2
Wasserspiegel $W_{TA}$ [m]	10,0 – 35,0
Überlagerung $H_{TA}$ [m]	13,0 – 40,0
Äquivalenter Quarzgehalt $\ddot{A}Qu$ [%]	31,4 – 88,9

Zusätzlich erlaubt die Datenanalyse für Schälmesser im Hinblick auf die Auslegung der TVM und die Steuerung des Abbauprozesses eine projektübergreifende Quantifizierung folgender Faktoren:

- Spurbesatz  $k$  (Anzahl identischer Schälmesser je Spur und Schneiradrehrichtung)
- Penetration  $p$  in mm/rev

Für Schneidrollen konnte analog der Einfluss der Schneidringbreite  $b_{SR}$  in mm projektübergreifend quantifiziert werden. Alle weiteren Einflussfaktoren aus der TVM Auslegung und der Steuerung des Abbauprozesses wurden für die Analyse des Einflusses geotechnischer Parameter auf den Laufweg  $s_c$  auf den in Tab. 1 angegebenen Wertebereich fixiert.

Für geotechnische Parameter zeigt die Datenanalyse, dass die Korrelation einzelner Parameter mit dem Laufweg  $s_c$  keine sinnvollen Ergebnisse liefert. Dagegen kann eine sehr gute Korrelation des Laufwegs  $s_c$  mit einem neu entwickelten Indexwert für die Abrasivität des Bodens dargestellt werden (Abb. 1). Der Soil Abrasivity Index (SAI) fasst dazu drei wesentliche Einflussfaktoren auf den Abrieb an Metalloberflächen beim Bodenabbau zusammen:

- Abrasivität der Bodenkomponenten
- Formparameter der Bodenkomponenten
- Spannung an der Kontaktfläche zwischen Bodenkomponenten und Werkzeugoberfläche

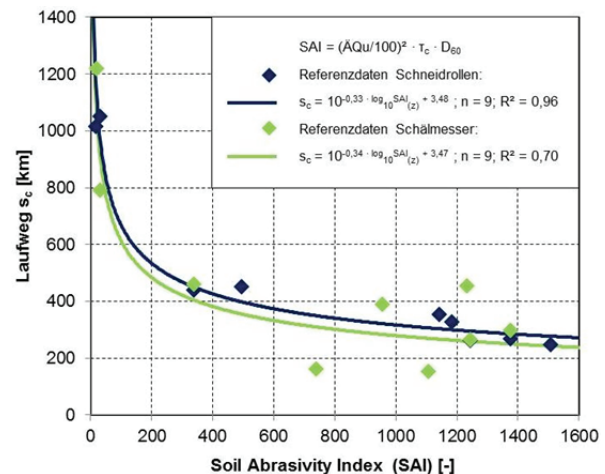


Abb. 1: Korrelation des Soil Abrasivity Index (SAI) mit dem Laufweg  $s_c$  für Schneidrollen und Schälmesser.

Fig. 1: Correlation of the Soil Abrasivity Index (SAI) and the cutting distance  $s_c$  of disc cutters and scrapers.

Im Soil Abrasivity Index werden in gewichteter Form der Äquivalente Quarzgehalt  $\ddot{A}Qu$  in %, die Scherfestigkeit des Bodens in der Ortsbrust  $\tau_c$  in kN/m<sup>2</sup> und der Korndurchmesser  $D_{60}$  in mm eingesetzt (2). Theoretisch besitzt der Index die Dimension N/m, auf Grund des empirischen Charakters sollte er jedoch als dimensionslos betrachtet werden.

$$SAI = \left( \frac{\ddot{A}Qu}{100} \right)^2 \cdot \tau_c \cdot D_{60} \quad (2)$$

### 3 Verschleißprognose

#### 3.1 Methodik

Der Prognoseprozess erfordert eine Unterteilung der Vortriebsstrecke in geotechnische Homogenbereiche, dazu werden die in Kap. 2 angegebenen Kriterien genutzt. Zusätzlich ist eine von Vortriebsbeginn ansteigende Nummerierung der Homogenbereiche  $HGB_{(z)}$  und Drucklufteinstiege  $I_{(z,m)}$  mit den ganzzahligen Indices  $z$  und  $m$  zu empfehlen. Abschließend ist analog zur Datenanalyse eine Trennung der Prognose in verschleißbedingte Vortriebsunterbrechungen  $I_v$  und Werkzeugwechsel  $n_{cv}$  und schadensbedingte Vortriebsunterbrechungen  $I_d$  und Werkzeugwechsel  $n_{cd}$  notwendig.

#### 3.2 Prognose des Laufwegs $s_c$

Für die Prognose des Laufwegs  $s_c$  wird mit (2) für jeden Homogenbereich  $HGB_{(z)}$  der Wert des  $SAI_{(z)}$  bestimmt. Damit kann für Schneidrollen (3) und für Schälmesser (4) der Basiswert  $s_{cb(z)}$  für den Laufweg bestimmt werden.

$$s_{cb(z)} = 10^{-0,33 \cdot \log_{10} SAI_{(z)} + 3,48} \quad (3)$$

$$s_{cb(z)} = 10^{-0,34 \cdot \log_{10} SAI_{(z)} + 3,47} \quad (4)$$

Für die weitere Prognose wird der Eingangswert  $s_{ck(z)}$  eingesetzt. Dieser muss nicht zwingend dem Basiswert  $s_{cb(z)}$  entsprechen, sondern kann theoretisch frei in einem Konfidenzintervall um  $s_{cb(z)}$  gewählt werden. Zu berücksichtigen ist dabei die entsprechende Änderung der Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha_s$  für die Überschätzung des tatsächlichen Laufwegs  $s_{c(z)}$  durch den Eingangswert  $s_{ck(z)}$ . Diese kann aus dem Basiswert  $s_{cb(z)}$ , dem gewählten Eingangswert  $s_{ck(z)}$  und der Standardabweichung  $\sigma_s$  durch Transformation aus der Standardnormalverteilung bestimmt werden und pflanzt sich in alle weiteren Prognoseschritte fort.

Der Eingangswert  $s_{ck(z)}$  wird anschließend um die bekannten quantifizierbaren Einflussfaktoren korrigiert. Daraus ergibt sich der Erwartungswert für den Laufweg  $s_{ce(z)}$ .

Für Schälmesser wird  $s_{ck(z)}$  sowohl um die Penetration  $p_{e(z)}$ , als auch um den geplanten Spurbesatz  $k$  korrigiert. Der Korrekturfaktor  $f_p$  für die Penetration  $p_{e(z)}$  ergibt sich aus:

$$f_p = \frac{1}{1,4^{\log_{0,5}\left(\frac{1,6}{p}\right)}} \quad (5)$$

Der Korrekturfaktor  $f_k$  für den Spurbesatz  $k$  ergibt sich aus:

$$f_k = 1,4^{(\log_2 k) - 1} \quad (6)$$

Der Erwartungswert für den Laufweg  $s_{ce(z)}$  für Schälmesser ergibt sich aus dem Eingangswert  $s_{ck(z)}$  und den beiden Korrekturfaktoren:

$$s_{ce(z)} = s_{ck(z)} \cdot f_p \cdot f_k \quad (7)$$

Für Schneidrollen wird  $s_{ck(z)}$  um die Schneidringbreite  $b_{SR}$  in mm korrigiert. Der Korrekturfaktor  $f_b$  ergibt sich aus:

$$f_b = \frac{b_{SR}}{19} \quad (8)$$

Analog zu (7) ergibt sich der Erwartungswert für den Laufweg  $s_{ce(z)}$  der Schneidrolle aus:

$$s_{ce(z)} = s_{ck(z)} \cdot f_b \quad (9)$$

Die nicht quantifizierbaren Einflussfaktoren können in diesem Prognoseschritt nicht berücksichtigt werden. Der Erwartungswert  $s_{ce(z)}$  ist folglich nur für Projekte zuverlässig, die hinsichtlich der Auslegung der TVM und der Steuerung des Abbauprozesses im Wertebereich der Referenzprojekte liegen (Tab. 1).

#### 3.3 Prognose der verschleißbedingten Vortriebsunterbrechungen $I_{v(z,m)}$

Ausgehend vom Erwartungswert für den Laufweg  $s_{ce(z)}$  in km und dem Durchmesser der TVM  $D_{TVM}$  in m wird für jeden Homogenbereich  $HGB_{(z)}$  die maximal erreichbare Länge der Intervalle  $b_{Iv,max(z)}$  in m zwischen den Vortriebsunterbrechungen  $I_{v(z,m)}$  bestimmt:

$$b_{Iv,max(z)} = \frac{s_{ce(z)} \cdot p_{e(z)} \cdot 1000}{2 \cdot \pi \cdot D_{TVM}} \quad (10)$$

Die Prognose des Wertes für die Intervalle  $b_{Iv,max(z)}$  wird für Schneidrollen und Schälmesser durchgeführt. In der Prognose der Vortriebsunterbrechungen  $I_{v(z,m)}$  wird zunächst nur der niedrigere der beiden Werte berücksichtigt.

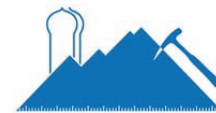
Die tatsächlichen Intervalle  $b_{Iv,act(z,m)}$  müssen im Vortrieb nicht zwingend  $b_{Iv,max(z,m)}$  entsprechen, sondern können auch kürzer gewählt werden (11). Die Stationierung der Vortriebsunterbrechungen  $I_{v(z,m)}$  ergibt sich aus der fortlaufenden Addition der Intervalle  $b_{Iv,act(z,m)}$ .

$$b_{Iv,act(z,m)} \leq b_{Iv,max(z,m)} \quad (11)$$

Damit können die Vortriebsunterbrechungen  $I_{v(z,m)}$  planmäßig vor kritische Bereiche gelegt werden, in denen z.B. keine Drucklufteinstiege für Werkzeugwechsel möglich sind. Diese können dann in Abhängigkeit ihrer Ausdehnung ohne Werkzeugwechsel durchfahren werden.

An der Grenze zwischen zwei Homogenbereichen kann die Länge der Intervalle  $b_{Iv,max(z,m)}$  höher liegen als die noch im Homogenbereich  $HGB_{(z)}$  aufzufahrende Vortriebsstrecke  $b_{I(z)}$ . Hier muss für die Ermittlung des ersten Intervalls  $b_{Iv,act(z+1,m+1)}$  im anschließenden Homogenbereich  $HGB_{(z+1)}$  der an der Grenze bereits bestehende Ausnutzungsgrad  $e_{c(z,m)}$  der Abbauprozesse berücksichtigt werden. Das erste Intervall  $b_{Iv,act(z+1,m+1)}$  im Homogenbereich  $HGB_{(z+1)}$  kann folglich mit (12) abgeschätzt werden.

$$b_{Iv,act(z+1,m+1)} \leq b_{Iv,max(z+1)} \cdot \sum \frac{b_{Iv(z)}}{b_{Iv,max(z)}} \quad (12)$$



### 3.4 Prognose der verschleißbedingten Werkzeugwechsel $n_{cv}$

Die Anzahl der Werkzeugwechsel  $n_{cv(z,m)}$  während einer Vortriebsunterbrechung  $I_{v(z,m)}$  hängt maßgeblich von der geplanten Länge des Intervalls  $b_{I_{v,act}(z,m+1)}$  bis zur folgenden Vortriebsunterbrechung  $I_{v(z,m+1)}$  ab. Das Kriterium für einen Werkzeugwechsel kann über den Ausnutzungsgrad der Abbauwerkzeuge formuliert werden. Ein Werkzeugwechsel ist erforderlich, wenn der Ausnutzungsgrad  $e_{c(z,m+1)}$  des Werkzeuges bis zur nächsten geplanten Vortriebsunterbrechung  $I_{v(z,m+1)}$  einen Wert größer als 1 annimmt und damit die Einsatzgrenze des Werkzeuges überschritten wird:

$$e_{c(z,m+1)} > 1 \quad (13)$$

Der Ausnutzungsgrad  $e_{c(z,m+1)}$  ergibt sich unter Berücksichtigung aller durchlaufender Homogenbereiche  $HGB_{(z)}$  bis zum anschließenden Drucklufteinstieg  $I_{v(z,m+1)}$  aus (14).

$$e_{c(z,m+1)} = \sum_{b_A}^{I_{v(z,m+1)}} \frac{S_{c(z)}}{S_{ce(z)}} \quad (14)$$

Der tatsächliche bzw. geplante Laufweg  $s_{c(z)}$  für jedes Werkzeug innerhalb der Homogenbereiche wird dazu unter Berücksichtigung der tatsächlich durchlaufenen bzw. geplanten Vortriebsstrecke und Penetration analog zu (1) bestimmt.

Die Anzahl  $n_{cv(z,m)}$  der zu wechselnden Abbauwerkzeuge  $c$  je Vortriebsunterbrechung  $I_{v(z,m)}$  ergibt sich folglich aus:

$$n_{cv(z,m)} = \sum_1^c e_{c(z,m+1)} > 1 \quad (15)$$

Die Gesamtanzahl  $n_{cv}$  der über die Vortriebsstrecke  $L_{TA}$  zu wechselnden Abbauwerkzeuge ergibt sich aus (16):

$$n_{cv} = \sum_1^m n_{cv(z,m)} \quad (16)$$

### 3.5 Vortriebsunterbrechungen zur Validierung des Laufwegs $s_c$

Die Prognose des Laufwegs  $s_c$  mit dem beschriebenen Modell bedingt eine hohe Schwankungsbreite der Ergebnisse. Diese pflanzt sich in die Bestimmung der Anzahl und Position der Drucklufteinstiege  $I_{v(z,m)}$  fort.

In der Vortriebsphase sollten deshalb nach der Einfahrt in einen neuen geotechnischen Homogenbereich kurze Drucklufteinstiege  $I_{e(z,m)}$  durchgeführt werden, um mit Verschleißmessungen den Erwartungswert für den Laufweg  $s_{ce(z)}$  und damit den Eingangswert  $s_{ck(z)}$  zu validieren.

Der Zeitpunkt der Validierung sollte so gesetzt werden, dass der Laufweg  $s_{c(z+1)}$  der Abbauwerkzeug im neuen Homogenbereich  $HGB_{(z+1)}$  die Untergrenze  $s_{cb,min(z+1)}$  des Konfidenzintervalls um  $s_{cb(z+1)}$  nicht überschreitet. Bei einer

$\alpha$ -Fehlerwahrscheinlichkeit von 10% kann die Untergrenze des Konfidenzintervalls durch Subtraktion des Abweichungsfaktors  $\Delta s_{c(z)}$  vom Basiswert  $s_{cb(z)}$  in (3) bzw. (4) ermittelt werden:

$$s_{cb,min(z)} = 10^{(-a \cdot \log_{10} SAI_z + b) - \Delta s_{c(z)}} \quad (17)$$

Die beiden Variablen  $a$  und  $b$  stehen hier stellvertretend für die entsprechenden Zahlenwerte für Schneidrollen aus (3) und Schälmesser aus (4). Der Abweichungsfaktor  $\Delta s_{c(z)}$  ergibt sich aus der Varianz der zu Grunde liegenden Daten und der  $\alpha$ -Fehlerwahrscheinlichkeit für Schneidrollen aus (18) und Schälmesser aus (19).

$$\Delta s_{cz} = 0,18 \cdot \sqrt{0,11 + \frac{(\log_{10} SAI_z - 2,6)^2}{4,5}} \quad (18)$$

$$\Delta s_{cz} = 0,32 \cdot \sqrt{0,11 + \frac{(\log_{10} SAI_z - 2,6)^2}{4,5}} \quad (19)$$

Die Untergrenze des Konfidenzintervalls  $s_{cb,min(z)}$  muss anschließend übereinstimmend mit dem Erwartungswert  $s_{ce(z)}$  analog (7) bzw. (9) korrigiert werden.

Zusätzlich muss in der Betrachtung der bereits bestehende Ausnutzungsgrad  $e_{c(z)}$  der Abbauwerkzeuge an der Grenze  $b_{(z)}$  zwischen den beiden Homogenbereichen  $HGB_{(z)}$  und  $HGB_{(z+1)}$  berücksichtigt werden. Dieser ergibt sich analog (14) unter Berücksichtigung aller durchlaufender Homogenbereiche einschließlich  $HGB_{(z)}$  aus:

$$e_{c(z)} = \sum_{b_A}^{b_{(z)}} \frac{S_{c(z)}}{S_{ce(z)}} \quad (20)$$

Die Validierung sollte also spätestens durchgeführt werden, wenn das Kriterium in (21) von mindestens einem der Abbauwerkzeuge auf dem Schneidrad erfüllt wird:

$$s_{c(z+1)} = s_{ce,min(z)} \cdot e_{c(z)} \quad (21)$$

Die Irrtumswahrscheinlichkeit  $\alpha_s$  für eine Überschätzung des Laufwegs  $s_{c(z)}$  durch den Erwartungswert  $s_{ce(z)}$  und damit die Wahrscheinlichkeit für einen Verschleißschaden an den Abbauwerkzeugen und der Schneidradstahlstruktur kann mit dieser Methode auf  $\leq 5\%$  reduziert werden.

### 3.6 Schadensbedingte Vortriebsunterbrechungen und Werkzeugwechsel

Die Prognose der verschleißbedingten Vortriebsunterbrechungen  $I_{v(z,m)}$  und Werkzeugwechsel  $n_{cv}$  umfasst keine Abbauwerkzeuge, die auf Grund von Schäden vor Erreichen der Einsatzgrenze gewechselt werden müssen. Schäden entstehen häufig durch:

- Steine oder Blöcke im Boden (BURGER 2006)
- Verklebungen (THEWES 1999)



- Nicht natürliche Hindernisse (z.B. Spundwände)

Für alle drei Faktoren stehen keine Methoden zur Verfügung, die eine durchgängige quantitative Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit für entsprechende Verhältnisse in der Ortsbrust, die daraus folgende Eintrittswahrscheinlichkeit für einen Schaden an den Abbauwerkzeugen und die entsprechende Schadensintensität ermöglichen.

Gleichzeitig können diese Auswirkungen in der Vortriebsplanung jedoch nicht vollständig vernachlässigt werden. Die Vortriebsstrecke sollte folglich bereits in der Planungsphase auf Hinweise auf die drei genannten Risiken überprüft werden. Werden entsprechende Risikobereiche festgestellt, liegt die Schätzung der Auswirkungen in Form von schadensbedingten Druckluftestiegen  $I_{d(z,m)}$  und zugehörigen Werkzeugwechseln  $n_{cd(z,m)}$ , sowie deren Berücksichtigung in der Planung weitgehend im Ermessen des Bearbeiters.

## 4 Vortriebsplanung

### 4.1 Ablaufplan

Aufbauend auf die beschriebene Verschleißprognose ist die Erarbeitung eines Ablaufplans für den Vortrieb notwendig. Dazu werden zunächst alle Vortriebsunterbrechungen  $I_v$ ,  $I_e$  und  $I_d$  entlang der Tunnelachse TA zusammengeführt. Die Gesamtanzahl der Vortriebsunterbrechungen  $n_I$  über die Länge der Tunnelachse  $L_{TA}$  ergibt sich folglich aus:

$$n_I = \sum_{L_{TA}} I_{v(z,m)} I_{e(z,m)} I_{d(z,m)} \quad (22)$$

Analog dazu ergibt sich die Gesamtanzahl der Werkzeugwechsel  $n_c$  über die Länge der Tunnelachse  $L_{TA}$  aus:

$$n_c = \sum_{L_{TA}} n_{cv} n_{cd} \quad (23)$$

Die Anordnung der Vortriebsunterbrechungen  $I_{(z,m)}$  erfolgt in der Verschleißprognose zunächst ohne Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen an den geplanten Stationierungen. Folglich muss im Anschluss überprüft werden, ob an diesen Stationierungen der Zugang zur Abbaukammer möglich ist. Kritische Bereiche können hier zum Beispiel sein:

- Bereiche, in denen nach gängigen Modellen (SCHWARZ et al. 2006) zur Berechnung des Stützdrucks Probleme mit der Ortsbruststabilität oder der Ausbläsersicherheit zu erwarten sind.
- Bereiche, in denen Druckluftestiege auf Grund eines Stützdrucks  $>3,6$  bar nur mit Mischgastechnik durchführbar sind.
- Bereiche mit setzungsempfindlicher Infrastruktur im Bereich der Tunnelachse.

Wird in der Verschleißprognose eine Vortriebsunterbrechung  $I_{(z,m)}$  in einem kritischen Bereich angeordnet, kann der Ablaufplan entsprechende angepasst werden. Maßnahmen dazu können sein:

- Anpassung der Lage von verschleißbedingten Vortriebsunterbrechungen  $I_{v(z,m)}$  durch Änderung des Intervalls  $b_{I,act(z,m)}$  (11). Zu beachten ist, dass sich auch alle nachlaufenden Vortriebsunterbrechungen  $I_{v(z,m)}$  verschieben, die Anzahl an Werkzeugwechseln  $n_{cv(z,m)}$  muss neu berechnet werden (15).
- Zusatzmaßnahmen zur Durchführung von Druckluftestiegen, z.B. Injektionen aus dem Schild heraus, Einbringung eines Dichtblocks oder Installation einer Mischgasanlage auf der Maschine.
- Präventive Maßnahmen zur Minimierung des Restrisikos, z.B. Überwachung der TVM Betriebsdaten, Verschleißerkennungssysteme an den Abbauwerkzeugen und Einsatz und Überwachung eines Metallabscheiders in der Separationsanlage.

Durch die Maßnahmen ergibt sich ein neuer Ablaufplan für den Vortrieb. Der beschriebene Planungsprozess kann mehrfach in iterativen Schritten wiederholt werden, um je nach Gewichtung zwischen Planungssicherheit und Herstellungskosten für das Tunnelbauwerk ein möglichst realistisches oder günstiges Planungsszenario zu erreichen.

### 4.2 Prognose der Verschleißkosten $k_v$

Die Prognose der Verschleißkosten  $k_v$  basiert auf dem Ablaufplan für den Vortrieb (Kap. 4.1). Die mögliche Bandbreite der Kostenarten in Verbindung mit dem Verschleiß der Abbauwerkzeuge ist in Tab. 2 zusammengefasst. Dabei ist eine Unterscheidung der Kosten in Werkzeugwechselkosten  $k_I$  für die Durchführung der Werkzeugwechsel und in Abbauwerkzeugkosten  $k_c$  für die Abbauwerkzeuge selbst, deren Bereitstellung und Sanierung sinnvoll.

Die tatsächliche Aufteilung und Zuordnung der genannten Kostenanteile hängt vom Kalkulationsansatz im Projekt ab. Wesentlich ist, dass alle genannten Kostenanteile entsprechend dem Ablaufplan in der Kalkulation berücksichtigt werden. Die absoluten Werte für die genannten Kostenanteile sind in hohem Maße projektspezifisch, sodass an dieser Stelle keine allgemein gültigen Aussagen dazu möglich sind. Auf Basis des Ablaufplans kann abschließend ein Erwartungswert  $k_{ve}$  für die Verschleißkosten bestimmt werden.

### 4.3 Szenariomethodik

Abschließend beruht der beschriebene Prognoseprozess an verschiedenen Stellen auf Parametern die einer natürlichen Schwankungsbreite unterliegen, oder auf Schätzungen, die ein erhebliches Potential für Abweichungen bergen:

- Varianz der geotechnischen Parameter (Tab.1).
- Realisierung der geplanten Maschinenparameter zur Steuerung des Abbauprozesses ( $p_{(z)}$ ,  $\rho_{SF}$ ) im Vortrieb (Tab. 1).
- Realisierung und Auswirkung von Schäden an den Abbauwerkzeugen (Kap. 3.6) im Vortrieb.
- Wirksamkeit der geplanten präventiven Maßnahmen und Zusatzmaßnahmen im Vortrieb (Kap. 4.1).



Tab. 2: Zusammensetzung der Verschleißkosten  $k_v$  für Abbauwerkzeuge beim Vortrieb mit Mix-Schild TVM in Lockergesteinen.

Tab. 2: Composition of the wear costs  $k_v$  for cutting tools on Mix-Shield TBMs in soft ground.

Verschleißkosten Mix-Schild TVM für Abbauwerkzeuge $k_v$						
Werkzeugwechselkosten $k_i$				Abbauwerkzeugkosten $k_e$		
Präventive Maßnahmen	Zusatzmaßnahmen	Stillstandskosten	Personalkosten	Materialkosten	Bereitstellungskosten	Sanierungskosten
$k_{PM}$	$k_{ZM}$	$k_{ST}$	$k_{PE}$	$k_{MA}$	$k_{BE}$	$k_{SA}$
Betriebsdatenüberwachung Verschleißerkennung Metallabscheider	Injektionen Zusätzliche Auflasten Dichtblöcke Installation einer Mischgasanlage	Zeitgebundene Stillstandskosten d. Baustelle	Personal (Ausführung d. Werkzeugwechsel)	Abbauwerkzeuge Zugehörige Ersatzteile	Transporte Zölle Steuern Lagerhaltung Finanzierung Abschreibung	Werkstatt Betriebsmittel Personal (Sanierung Abbauwerkzeuge)

Abweichungen dieser Parameter im Vortrieb von den in der Planung angesetzten Werten können erhebliche Auswirkungen auf den Vortriebsablauf und die Verschleißkosten  $k_v$  haben.

Um diese Auswirkungen in der Planungsphase einschätzen zu können, kann die Bildung verschiedener Vortriebszenarien sinnvoll sein. Dazu werden die genannten Parameter gezielt hin zu günstigeren oder ungünstigeren Fällen variiert. Daraus ergeben sich verschiedene Varianten für den Ablaufplan und die zugehörigen Verschleißkosten  $k_v$ .

Wird eine ausreichend hohe Anzahl an Szenarien durchgerechnet, kann mit dieser Methode theoretisch die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Verschleißkosten  $k_v$  bestimmt werden. Auf Grund des hohen Aufwands wird die Berechnung in der Praxis jedoch häufig auf das günstigste ( $k_{v,min}$ ) und ungünstigste ( $k_{v,max}$ ) denkbare Szenario beschränkt.

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Verschleißkosten  $k_v$  ist vermutlich nicht stetig und unimodal, sodass mit dem günstigsten und ungünstigsten Szenarien ausschließlich qualitative Aussagen getroffen werden können, wie hoch die Wahrscheinlichkeit einer Über- oder Unterschreitung des Erwartungswertes für die Verschleißkosten  $k_{ve}$  durch die im Vortrieb anfallenden Verschleißkosten  $k_v$  ist.

## 5 Diskussion

Die Anwendung des Prognosemodells in aktuellen Projekten ist im vorliegenden Bearbeitungsstand noch mit vergleichsweise hohem Aufwand verbunden, der vermutlich durch Umsetzung des Modells in einer Software deutlich zu reduzieren wäre. Zudem liegen in der Planungsphase eines Projektes häufig nicht alle notwendigen Eingangsdaten vor, wie z.B. der detaillierte Spurplan des Schneidrades. Hierzu ist eine Methode zur überschlägigen Schätzung der notwendigen Werkzeugwechsel  $n_{c(z,m)}$  in Abhängigkeit der Kontrollintervalle  $b_{I,act(z,m)}$  auf Basis einer Simulation verschiedener TVM in unterschiedlichen Böden in Arbeit.

Zusammenfassend bietet das Prognosemodell im Vergleich zu bestehenden Möglichkeiten (KÖHLER et al. 2011) eine deutlich verbesserte Grundlage zur Verschleißprognose für Mix-Schild TVM in Lockergesteinen. Zudem erlaubt die

Szenariomethodik eine probabilistische Betrachtung der Verschleißkosten  $k_v$ , sodass eine deutlich realistischere Beurteilung der mit den entsprechenden Plankosten und Angebotspreisen verbundenen Chancen und Risiken möglich wird (SANDER & SPIEGEL 2011).

Bei konsequenter Umsetzung muss die Verschleißprognose in der Vortriebsphase nachverfolgt werden, um eine ständige Anpassung des Ablaufplans und die Mitführung einer Kostentrendanalyse zu ermöglichen. Dazu ist eine deutliche Verbesserung der Dokumentationsmethoden im Vortrieb notwendig (WENDL 2012). Aufbauend auf diese Daten kann das bestehende Prognosemodell validiert und um bisher nicht quantifizierbare Einflussfaktoren erweitert werden.

## Literatur

- BURGER, W. (2006): Schneidräder für Lockergestein: Prinzipien und Auslegungsaspekte - Tunnel, 2: 8-19.
- KÖHLER, M., MAIDL, U. & MARTAK, L. (2011): Abrasivität und Werkzeugverschleiß beim Schildvortrieb im Lockergestein - Geomechanics and Tunneling, Volume 4, 1: 36-53.
- SANDER, P. & SIEGEL, M. (2011): Der Trugschluss der exakten Zahl - Fortschrittlichere Wege zur Kosten- und Risikoanalyse - bau aktuell, März 2011: 65 - 69.
- SCHWARZ, J., SCHMIDT, J., MAIDL, R., HANDKE, D. (2006): Stützdruckberechnung beim Hydroschildvortrieb - Stand der Technik, dargestellt am City-Tunnel Leipzig - Beiträge zum 5. Geotechnik-Tag in München.
- THEWES, M. (1999): Abhäsion von Tonböden beim Tunnelvortrieb mit Flüssigkeitsschilden - Berichte aus Bodenmechanik und Grundbau der Bergischen Universität Wuppertal, FB Bauingenieurwesen, 21: 190.
- THURO, K. (2002): Geologisch-felsmechanische Grundlagen der Gebirgslösung im Tunnelbau - Münchner geologische Hefte, Reihe B, Angewandte Geologie, 18: 160.
- WENDL, K. (2012): Ingenieurgeologische Vortriebsdokumentation und Auswertung von Hydroschildvortrieben. - Münchner geowissenschaftliche Abhandlungen, Reihe B, Ingenieurgeologie, Hydrogeologie, Geothermie, 18: 148.